

Optimización de sustrato para germinación de semilla de lechuga crespa en cultivos hidropónicos

Echeverry Buitrago, Luisa Fernanda^a

Diego A. Acosta M.^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Resumen

La hidroponía es una técnica prometedora que disminuye el uso de recursos como el agua, soluciones nutritivas y espacio; esta, a su vez, permite la posibilidad de usar suelos infértiles para la producción agrícola. Las condiciones del sustrato en las que se desarrolla la semilla reflejan la calidad del producto final, por lo cual, es de vital importancia determinar un sustrato que no eleve de manera significativa los costos de producción, y que a su vez otorgue el soporte físico y químico que esta requiere para su desarrollo. La optimización de la fórmula de sustratos y análisis de costos de producción de lechuga crespa *Lollo bionda levistro* es el objetivo de esta tesis. El experimento se llevó a cabo en el municipio de La Estrella, Antioquia, para el cual se usó un diseño de experimentos de mezclas simplex con centroide para turba, cascarilla de arroz y arena gruesa como sustratos base; el humus fue usado como sustrato comercial con el fin de confrontar resultados. Las variables de respuesta analizadas fueron porcentaje de germinación a las 60 horas, porcentaje de plantas trasplantadas, longitud de la raíz, longitud del tallo, número de hojas, grosor del tallo, tiempo a trasplante y porcentaje total de germinación. El análisis se llevó a cabo por medio de los coeficientes estadísticos arrojados en las regresiones lineales y lineales con interacciones para cada variable de respuesta. Se determinó como formulación óptima 0.5:0.5 arena y turba respectivamente, la cual generó los valores óptimos en las variables de respuesta. El análisis con respecto al humus en relación a eficacia y costos también determinó que la formulación óptima arrojó mejores resultados en las variables de respuesta y logró reducir los costos a un 33.5% de los incurridos al usar humus. Esta investigación se realizó para ayudar a Aqualégumina, un emprendimiento que al igual que otros pequeños agricultores, busca reducir costos sin afectar la calidad de sus productos.

1. Introducción

Para el año 2050, se estima un incremento significativo en la población mundial, en el cual se alcanzarán los 9 billones de personas; este crecimiento, a su vez, está asociado con un aumento significativo en la demanda de alimentos. Los países agrícolas juegan un papel de vital importancia, y se espera que su producción se duplique con la finalidad de suplir la demanda estimada en los próximos años [1]. En 2017, Colombia exportó \$ US 37,800 millones [2], donde los principales productos de exportación fueron petróleo crudo, briquetas de carbón, café, refinado de petróleo y oro [3]; y, a pesar de que Colombia posee 22 millones de hectáreas cultivables, solo 4.8 de estas se destinan para producción agrícola [1]. El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural tiene como objetivo promover el desarrollo rural con un enfoque en el incremento de la productividad, garantizando la oferta constante, la mejora de la calidad de los productos y fomento de las

exportaciones agropecuarias [4]. Estas circunstancias llevan a la necesidad de intensificar las prácticas agrícolas, en las cuales por sus características se puede destacar la hidroponía; esta técnica permite la producción de alimentos libres de patógenos y pesticidas; asimismo, en comparación con las prácticas agrícolas tradicionales, requiere una menor exigencia de mano de obra, hace un uso más eficiente de las superficies y recursos necesarios para el desarrollo de los cultivos, disminuyendo costos de producción y aumentando la densidad de producción por metro cuadrado [5], [6], [7], [8].

Los recursos necesarios para llevar a cabo la producción agrícola en cultivos hidropónicos varía de acuerdo con las necesidades del cultivo, experiencia del agricultor y la clase de sistema hidropónico que se encuentra implementado; sin embargo, la etapa de almácigo es elemental en cada caso y es la análoga [6], [9], [10]. Las propiedades y características físicas y químicas que caracterizan el sustrato (y son entregadas o usadas como soporte a la plántula) determinan si esta es apta o no para el trasplante definitivo [11]. La importancia de la selección del sustrato adecuado radica en elaborar un proceso de producción eficiente, en el cual la semilla pueda germinar en las condiciones óptimas, dando paso a una plántula fortalecida; el sustrato debe permitir el anclaje y aferración de las raíces protegiéndolas de la luz, permitiéndoles la respiración y contener el agua y los nutrientes que la planta necesita, lo cual se traduce en una mayor actividad en la rizosfera [6], [7]. M. Raviv, R. Wallach, A. Silber, A. Bar-Tal, exponen en su investigación “*Substrates and their Analysis*” algunas de las características físicas y químicas propicias en la hidroponía, donde se resaltan pH, conductividad eléctrica, retención de fósforo, disponibilidad de nutrientes, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, distribución y tamaño de partículas, conductividad hidráulica, entre otras [6], [12], [13]. En tal sentido, los autores M. V. Mickelbart, K. M. Stanton, J. J. Camberato, and P. Agronomy, en “*Commercial Greenhouse and Nursery Production Soil pH*,” y A. P. Torres, D. Camberato, R. G. Lopez, and M. Mickelbart, en “*Producción Comercial de Cultivos Bajo Invernadero y Vivero*”, junto con la Universidad Purdue, investigan las propiedades químicas del pH y la conductividad eléctrica ideales en cultivos, donde, a rasgos generales, el pH debe permanecer entre 5 y 7 debido a que, en este rango, tanto los macronutrientes como los micronutrientes se encuentran solubles y se pueden aprovechar por la planta y la conductividad eléctrica entre 0.26-0.75 mS/cm para evitar problemas de fitotoxicidad [13], [14], [15], [16].

Según L. Yang, H. Cao, Q. Yuan, S. Luo, and Z. Liu, en su investigación “*Component optimization of dairy manure vermicompost, straw, and peat in seedling compressed substrates using simplex-centroid design*”, las propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio), al igual que propiedades físicas (fuerza mecánica, densidad, capacidad de retención de humedad, porosidad) favorecen el desarrollo adecuando de la planta. Esta investigación se llevó a cabo en China y tuvo como objetivo evaluar el desarrollo de las semillas de pepino a través de un diseño simplex con centroide para humus, turba y paja de arroz; las condiciones ideales se dieron en la proporción 0.5917:0.1608:0.2475, humus, paja de arroz y turba respectivamente [10]. Igualmente, N. E. Barrios Arreaga en su tesis “*Evaluación del cultivo de la lechuga, Lactuca sativa L. bajo condiciones hidropónicas en Pachalí, San Juan Sacatepéquez, Guatemala*” realizó todo el proceso de producción de lechuga en hidroponía, abarcando desde el almácigo hasta el trasplante definitivo; la autora llevó a cabo los experimentos en la etapa de almácigo con los sustratos cascarilla de arroz y arena fina a una proporción 1:1; no obstante, su investigación se enfocó en evaluar el desarrollo de tres variedades de lechuga *Lactuca sativa L.*, en dos sustratos: líquido y sólido (50% arena blanca y 50% cascarilla de arroz) en la etapa de trasplante definitivo; el resultado de la investigación concluye que el mejor sustrato para cultivo hidropónico de lechuga es el sólido.

Este proyecto de grado investiga la formulación y evaluación de sustratos como medio de desarrollo en la etapa de germinación desde la semilla y su desarrollo hacia la plántula de lechuga crespa *Lollo bionda levistro* en las fases de almácigo y post-almácigo, generando las variables de respuesta ideales en su crecimiento y desarrollo con el objetivo de obtener una plántula apta para el trasplante definitivo. En esa misma línea, la investigación emplea turba, cascarilla de arroz y arena gruesa como sustratos base; los criterios de selección se deben a que estos cumplen con las propiedades físicas y químicas idóneas, su disponibilidad y bajo costo en el mercado [17], [18]. A través de un diseño de experimentos de mezclas simplex con centroide, se pretende determinar el efecto de los componentes individuales y las respectivas mezclas, para así identificar la proporción óptima de estos, reduciendo los recursos empleados y realizando el análisis de costos del proceso

de producción con el propósito de disminuirlos. Asimismo, propone la evaluación del sustrato óptimo encontrado frente a uno comercial (humus), con el objetivo de confrontar los resultados con base a la rentabilidad y la eficiencia.

2. Materiales y métodos

2.1 Materias primas y materiales

El experimento se llevó a cabo en La Estrella Antioquia a una altura de 1775 msnm y promedio de temperatura entre 15 y 20°C. Las semillas de lechuga cresa (*Lollo bionda levistro*) fueron adquiridas en *Sáenz Fety*, su adaptabilidad se encuentra entre los 1600 y 2700 msnm [19]. Se emplearon dos bandejas de germinación con 128 cavidades cada una. A continuación, en la tabla 1 se presentan las propiedades físicas y químicas de los sustratos, que fueron evaluadas, para la selección de estos.

Tabla 1. Propiedades sustratos

Sustrato	Propiedades	Sustrato	Propiedades
Turba	95% de materia orgánica	Cascarilla de arroz	Desecho orgánico liviano
	75% de fibra		Cohesión
	pH≈6.6		pH≈7
	Densidad aparente ≈0.10 g/cm ³		Densidad aparente ≈ 0.115 g/cm ³
	Conductividad eléctrica 0.311 mS/cm		Conductividad eléctrica 0.445 mS/cm
	Capacidad de retención de humedad≈14.78%		Capacidad de retención de humedad≈17.23%
Arena gruesa	Químicamente inerte	Humus	Disponibilidad mayor de nutrientes
	15 a 35% de aire		Capacidad de retención de humedad≈25.12%
	pH≈6.8		pH≈5.9
	Densidad aparente ≈ 1.8 g/cm ³		Densidad aparente ≈ 0.6 g/cm ³
	Capacidad de retención de humedad≈26.5%		Conductividad eléctrica 2.45 mS/cm
	Conductividad eléctrica 0.081 mS/cm		

Fuente: elaboración propia.

2.2 Diseño de experimentos

Turba, cascarilla de arroz y arena gruesa fueron los sustratos seleccionados para optimizar la eficiencia de la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de lechuga cresa, con el fin de poder cuantificar la influencia que estos tienen en las características de la plántula apta para el trasplante definitivo. Se realizó un diseño de experimentos de mezclas simplex con centroide para determinar cuáles de los sustratos o interacciones entre estos tienen mayor influencia sobre las variables de respuesta de interés. Cada tratamiento se preparó tres veces con seis réplicas, para dar un total de 18 corridas por cada uno. La figura 1 presenta el diagrama ternario obtenido y la tabla 2 ilustra las formulaciones determinadas. Los tratamientos y el humus fueron evaluados para las variables de respuesta (grosor y longitud del tallo, longitud de la raíz, porcentaje y tiempo de germinación, tiempo para el trasplante, porcentaje de plantas trasplantables y número de hojas).

Los modelos de regresión lineal y lineal con interacciones, fueron ajustados para investigar el efecto de los componentes sobre las variables de respuesta nombradas, establecer las diferencias significativas y determinar valores atípicos. A continuación, se presentan las ecuaciones 1 y 2 correspondientes a los modelos estadísticos, donde \hat{y}_i es la respuesta predicha, β_i es el coeficiente de regresión para cada término de efecto lineal, β_{ij} es un término de interacción binaria y x_i, x_j son las variables independientes. Las variables independientes: X_A representa arena gruesa, X_C cascarilla de arroz y X_T turba (ecuación 1 y 2).

Tabla 2. Tratamientos

Tratamiento	X_A	X_C	X_T
T_1	0	0	1
T_2	1	0	0
T_3	0	1	0
T_4	0.333	0.333	0.333
T_5	0	0.5	0.5
T_6	0.5	0	0.5
T_7	0.5	0.5	0
T_8	0.3	0.3	0.4
T_9	0.3	0.4	0.3
T_{10}	0.4	0.3	0.3
T_H	Humus		

Fuente: elaboración propia

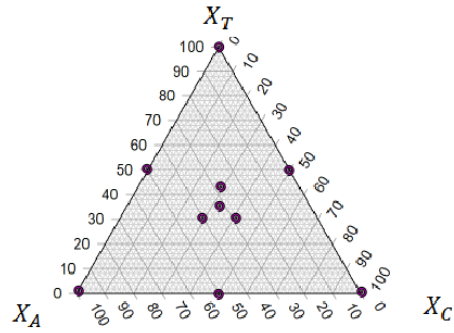


Figura 1. Distribución de los tratamientos.

Fuente: elaboración propia

$$\hat{y}_i = \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i$$

Ecuación (1)

$$\hat{y}_i = \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j$$

Ecuación (2)

2.3 Preparación del almácigo

Primero se procedió a desinfectar las bandejas germinadoras con hipoclorito de sodio al 3% (v/v); haciendo uso de una balanza analítica y una probeta, se tomaron los volúmenes respectivos de cada sustrato para formar los tratamientos mencionados en la tabla 2; se homogenizaron las mezclas haciendo uso de un recipiente hondo y posteriormente cada tratamiento se llevó a capacidad de campo agregando agua. Las medidas de pH y conductividad eléctrica se tomaron en los sustratos mediante el método de disolución 1:2 [14], en el cual se combinaron 20 cm^3 de sustrato por 40 cm^3 de agua destilada, se dejó reposar la mezcla por 30 minutos y finalmente se hizo uso de un pHmetro y conductímetro para tomar las medidas respectivas; la tabla 3 contiene las propiedades químicas mencionadas. Finalmente, los tratamientos se situaron de manera completamente aleatoria en las bandejas germinadoras. La imagen 1 ilustra el montaje del almácigo mientras que la figura 2 describe la distribución de cada tratamiento. Las bandejas fueron ubicadas en una mesa cubierta con aserrín húmedo a un metro de altura del piso en un espacio abierto con buena iluminación.

Tabla 3. Propiedades químicas de los sustratos

Sustrato	pH	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
Arena	6.8	0.081
Cascarilla de arroz	7	0.445
Humus	5.9	0.311
Turba	6.6	2.45

Fuente: elaboración propia



Imagen 1. Etapa de almácigo

Fuente: elaboración propia

T ₅	T ₅	T ₅	T ₉	T ₉	T ₁₀	T ₁₀	T ₁₀
T ₅	T ₅	T ₅	T ₉	T ₉	T ₁₀	T ₁₀	T ₁₀
T ₆	T ₆	T ₆	T ₉	T ₉	T ₁₀	T ₁₀	T ₁₀
T ₆	T ₆	T ₆	T _H	T _H	T ₅	T ₅	T ₅
T ₇	T ₇	T ₇	T _H	T _H	T ₈	T ₈	T ₈
T ₇	T ₇	T ₇	T _H	T _H	T ₈	T ₈	T ₈
			T ₁₀	T ₁₀	T ₇	T ₇	T ₇
			T ₁₀	T ₁₀	T ₇	T ₇	T ₇
T ₉	T ₉	T ₉	T ₁₀	T ₁₀			
T ₉	T ₉	T ₉					
			T _H	T _H			
			T _H	T _H			
T ₈	T ₈	T ₈			T ₁₀	T ₁₀	T ₁₀
T ₈	T ₈	T ₈	T ₆	T ₆	T ₁₀	T ₁₀	T ₁₀
			T ₆	T ₆	T ₉	T ₉	T ₉
			T ₆	T ₆	T ₉	T ₉	T ₉

T ₁	T ₁	T ₁	T ₄	T ₄	T ₃	T ₃	T ₃
T ₁	T ₁	T ₁	T ₄	T ₄	T ₃	T ₃	T ₃
T ₂	T ₂	T ₂	T ₄	T ₄	T ₅	T ₅	T ₅
T ₂	T ₂	T ₂	T ₈	T ₈	T ₅	T ₅	T ₅
T ₃	T ₃	T ₃	T ₈	T ₈			
T ₃	T ₃	T ₃	T ₈	T ₈			
T ₁	T ₁	T ₁	T ₄	T ₄	T ₆	T ₆	T ₆
T ₁	T ₁	T ₁	T ₄	T ₄	T ₆	T ₆	T ₆
T ₂	T ₂	T ₂	T ₄	T ₄	T ₅	T ₅	T ₅
T ₂	T ₂	T ₂			T ₅	T ₅	T ₅
T ₃	T ₃	T ₃					
T ₃	T ₃	T ₃					
T ₁	T ₁	T ₁			T _H	T _H	T _H
T ₁	T ₁	T ₁	T ₇	T ₇	T _H	T _H	T _H
T ₂	T ₂	T ₂	T ₇	T ₇	T ₄	T ₄	T ₄
T ₂	T ₂	T ₂	T ₇	T ₇	T ₄	T ₄	T ₄

Figura 2. Distribución de los tratamientos.

Fuente: elaboración propia

2.4 Siembra

La siembra se elaboró el día 11 de septiembre de 2018 a las 8:00 pm. Haciendo uso de un recipiente plano y unas pinzas de laboratorio se situaron dos semillas por cada alveolo (previamente llenado con los tratamientos a capacidad de campo), para después taparlas con el sustrato a una profundidad de dos veces el tamaño de ellas; se presionó suavemente cada sustrato para disminuir el aire contenido y aumentar el contacto entre las semillas y el sustrato; por último, se agregó nuevamente agua en nebulización para humedecer las semillas. Las bandejas germinadoras se cubrieron con tablas de icopor y periódico bajo un riego de tres veces al día para mantener la humedad. El día que se dio la geminación de las primeras plántulas se descubrieron las bandejas y se dejaron expuestas a la luz natural. El riego se mantuvo tres veces al día por medio de nebulización; a partir del sexto día se proporcionó la solución nutritiva (la tercera parte de la solución concentrada total) haciendo uso de una jeringa y disponiendo 2,5 ml por cada alveolo. La solución nutritiva contenía quelato de hierro, fósforo, magnesio, nitratos y ácido fosfórico.

2.5 Post- almácigo

Al completar la segunda semana, las plántulas iniciaron la etapa de post almácigo, en la cual, se suspendió el riego para dar paso a la instalación de las bandejas germinadoras en una superficie profunda con la solución nutritiva (50% de la solución concentrada total), en la cual, la solución cubrió la mitad de la altura de las bandejas; de esta manera, las plántulas pasaron a absorber sus requerimientos nutritivos a través de las raíces que quedaron suspendidas en la solución; este proceso favoreció la adaptación de las plántulas al sistema de raíz flotante. Las imágenes 2 y 3 muestran la instalación que se llevó a cabo. La etapa de post- almácigo para las lechugas tuvo una duración de dos semanas.



Imagen 2. Etapa post-almácigo

Fuente: elaboración propia



Imagen 3. Etapa post-almácigo

Fuente: elaboración propia

2.6 Toma de medidas

Algunas de las variables de respuesta como tiempo de germinación, porcentaje de germinación y tiempo a trasplante, fueron medidas en el transcurso del proceso; las otras variables de respuesta se tomaron al finalizar la etapa post-almácigo a las cuatro semanas de la siembra, las imágenes 4 y 5 evidencian el tamaño y condiciones de las plántulas en el momento de la toma de medidas antes del trasplante definitivo. La extracción de las plántulas y toma de medidas se llevó a cabo en horas de la tarde, haciendo uso de unas paletas planas de madera y un envase con agua para retirar el pilón. A continuación, se describe el procedimiento para medir cada variable de respuesta.

- *Tiempo de germinación: monitoreo de número de plantas emergidas a las 24, 36, 48 y 60 horas después de la plantación.*
- *Porcentaje de germinación = $\frac{\text{Número de plantas emergidas}}{\text{Número de semillas sembradas}} * 100$. (Se mide en relación al tiempo de germinación).*
- *Tiempo a trasplante: duración en semanas que tardaron las plantas en ser aptas para el trasplante.*
- *Porcentaje de plantas trasplantables = $\frac{\text{Número de plantas aptas para trasplante}}{\text{Número de semillas sembradas}} * 100$*
- *Longitud del tallo: medida al punto de inserción en el tallo de la última hoja verdadera.*
- *Grosor del tallo: toma realizada en la base.*
- *Longitud de la raíz: medida tomada desde que termina el tallo hasta la punta de la raíz más larga.*



Imagen 4. Etapa previa al trasplante definitivo.
Fuente: elaboración propia



Imagen 5. Etapa previa al trasplante definitivo.
Fuente: elaboración propia

3. Resultados y análisis

3.1 Análisis de costos

El análisis de costos se elaboró para cada ensayo, teniendo en consideración las materias primas (sustratos y semillas), mano de obra, tiempo en la preparación de cada sustrato, acondicionamiento del almacigo y siembra de las semillas. A continuación la tabla 4 presenta el análisis de costos escueto para un supuesto de producción de 1000 lechugas, el análisis más detallado se encuentra en el anexo 1.

La columna costo por alveolo representa el valor de cada sustrato en las respectivas proporciones indicadas por el diseño de mezclas; en los cuales, el tratamiento más costoso es el humus seguido por la turba. No obstante, se consideraron otros factores como mano de obra y tiempo de preparación del sustrato debido a que, la preparación de los tratamientos 1, 2, 3 y el humus no requieren el mismo tiempo en mano de obra que requieren los demás tratamientos, sin embargo estos costos siguen siendo menores que la diferencia entre el humus y los demás tratamientos.

Tabla 4. Análisis de costos por tratamiento.

	XA	XC	XT	Costo por aveólo	Costo mano de obra	Costo de producción para 1000 lechugas
T1	0	0	1	\$ 19,62	\$ 18.150,00	\$ 61.770,00
T2	1	0	0	\$ 4,76	\$ 18.150,00	\$ 22.905,10
T3	0	1	0	\$ 10,14	\$ 18.150,00	\$ 28.293,00
T4	0.333	0.333	0.333	\$ 11,49	\$ 21.450,00	\$ 32.944,53
T5	0	0.5	0.5	\$ 14,88	\$ 21.450,00	\$ 36.331,50
T6	0.5	0	0.5	\$ 12,19	\$ 21.450,00	\$ 33.637,55
T7	0.5	0.5	0	\$ 7,45	\$ 21.450,00	\$ 28.899,05
T8	0.3	0.3	0.4	\$ 12,32	\$ 21.450,00	\$ 33.767,43
T9	0.3	0.4	0.3	\$ 11,37	\$ 21.450,00	\$ 32.819,73
T10	0.4	0.3	0.3	\$ 10,83	\$ 21.450,00	\$ 32.280,94
Humus				\$ 82,08	\$ 18.150,00	\$ 100.230,00

Fuente: elaboración propia

3.2 Variables de respuesta

Las variables de respuesta obtenidas por cada tratamiento durante las etapas de almácigo y post-almácigo se registraron en la tabla 5. Los valores totales por tratamiento de las variables de respuesta: porcentaje de emergencia, porcentaje de plantas trasplantables, porcentaje de germinación total, tiempo a trasplante se encuentran consignados. Para variables que arrojaron 18 resultados por cada tratamiento (longitud del tallo y la raíz, grosor del tallo y número de hojas) se realizó un promedio del total de las corridas, los valores totales se encuentran en el anexo 2. El tiempo para llevar a cabo el trasplante a partir de la siembra, se determinó de acuerdo con la ficha técnica de la semilla proporcionada por el proveedor [19]. El porcentaje de emergencia por cada tratamiento a las 60 horas representa la sumatoria total de semillas emergidas entre las 24 y 60 horas posteriores a la siembra, este rango fue el tiempo en el cual germinaron la mayoría de las semillas, donde, únicamente los tratamientos 7 (0.5:0.5:0) y 10 (0.4:0.3:0.3 arena cascarilla y turba respectivamente) obtuvieron el 100%. La uniformidad en el tiempo de emergencia se puede observar en la columna porcentaje de plantas trasplantables y aunque el 100% de las plántulas por cada tratamiento germinó; las que tardaron más de las 60 horas se vieron afectadas generando una fracción por tratamiento que no fue apta para el trasplante, la columna porcentaje de plantas trasplantables representa de manera cuantitativa estos valores.

3.3 Análisis estadístico

Ajuste de modelos y análisis de regresión

Todas las variables independientes y de respuesta se ajustaron a los modelos lineales y lineales con interacciones como se muestra en la tabla 5, también se presentan los coeficientes de determinación R^2 , donde, todos los modelos dieron un R^2 superior a 0.9503 lo cual indica una buena adaptación en las regresiones; el mejor ajuste se obtuvo para el grosor del tallo mediante ambas regresiones con un valor de 0.999; sin embargo, los valores de las ecuaciones no presentan diferencias significativas; es decir, los tratamientos no infirieron en esta variable; por otro lado, la emergencia a las 60 horas presentó valores de 0.9971 (lineal) y 0.9998 (interacciones) siendo este el modelo que mejor se adaptó. Los coeficientes en la regresión con interacciones que superaron el valor crítico ($p > 0.05$) en el test de coeficiente estadístico fueron eliminados de las ecuaciones. Por último, el criterio de akaike se usó para elegir el modelo por cada variable dependiente que más se ajustó; los valores arrojados se encuentran consignados de igual manera en la tabla 6, se eligió la ecuación determinada por la regresión lineal con interacciones para la longitud del tallo, longitud de la raíz y porcentaje de plantas trasplantadas y la ecuación lineal pura se usó para realizar los diagramas de grosor del tallo, número de hojas y la emergencia de las semillas a las 60 horas. Las modelaciones en R, códigos y resultados completos se encuentran en el anexo 4.

Los diagramas ternarios expresan las variaciones en las variables de respuesta con relación a los sustratos puros: arena, cascarilla de arroz y turba; esta relación se muestra gráficamente en la figura 3a-f a través de los diagramas modelados con las ecuaciones seleccionadas a partir del criterio de akaike. Cada vértice del triángulo equilátero equivale a los sustratos puros y cada vector de este representa una mezcla con proporciones diferentes. La figura 3.a expone el efecto de la mezcla de sustratos para la longitud del tallo, siendo las interacciones entre X_T y X_A las que presentan una mayor influencia en la respuesta, según la tabla 5, la mezcla que representa el tratamiento con la longitud del tallo más alta fue el tratamiento 6. Este mismo hecho ocurre para en la figura 3.b para la variable longitud de la raíz, sin embargo, se observó que la curva que da el mayor nivel se pronunció un poco más, indicando que la longitud de la raíz se puede obtener con el tratamiento 6 u otra formulación diferente que contenga una mezcla con una proporción de los tres sustratos puros, en la cual, sea mayor la proporción de turba y arena y una parte menor de cascarilla de arroz. Las figuras 3.c y 3.b presentan las interacciones de los sustratos en las variables grosor del tallo y número de hojas respectivamente, sin embargo, sus coeficientes no otorgan diferencias significativas. La figura 3.e presenta los porcentajes más altos en la emergencia de las semillas entre las 24 y 60 horas, para la cual los resultados óptimos se generaron en los tratamientos que contenían una mayor cantidad de cascarilla de arroz, como los tratamientos 6 y 7, aunque, el uso de cascarilla de arroz solo no presentó resultados óptimos (tabla 5). Las interacciones para la variable de respuesta porcentaje de plántulas trasplantadas está expresada en la figura 3.f y determinó un rango más amplio de composiciones, en los cuales, los tratamientos que contienen una mayor proporción de turba arrojaron valores cercanos al 100%.

Tabla 5. Variables de respuesta.

	Arena	Cascarilla	Turba	Longitud tallo (cm)	Longitud raíz (cm)	Grosor tallo (cm)	Número de hojas	Emergencia total a las 60h	Porcentaje de plantas trasplantadas	Porcentaje de germinación	Tiempo a trasplante (semanas)
1	0	0	1	10.14	11.56	0.16	3	94.4%	100%	100%	4
2	1	0	0	9.25	10.07	0.16	3	88.9%	94.4%	100%	4
3	0	1	0	8.46	10.50	0.16	3	83.3%	83.3%	100%	4
4	0.333	0.333	0.333	10.97	12.36	0.16	3	94.4%	100.0%	100%	4
5	0	0.5	0.5	8.76	9.55	0.16	3	83.3%	88.9%	100%	4
6	0.5	0	0.5	10.78	12.36	0.16	3	94.4%	100%	100%	4
7	0.5	0.5	0	9.19	11.34	0.16	3	100%	100%	100%	4
8	0.3	0.3	0.4	11.83	13.17	0.16	4	94.4%	100%	100%	4
9	0.3	0.4	0.3	9.32	10.82	0.16	3	94.4%	100%	100%	4
10	0.4	0.3	0.3	9.44	10.83	0.16	3	100.0%	94.4%	100%	4
Humus				10.04	12.44	0.16	3	88.9%	100%	100%	4

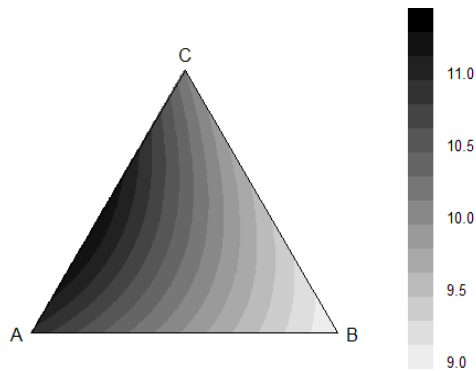
Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Regresiones lineales por variable de respuesta

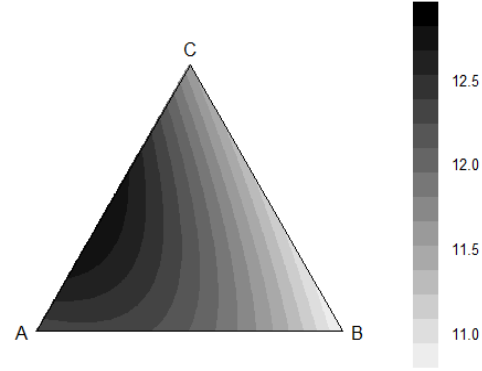
Variable dependiente	Lineal pura	Lineal con interacciones
Longitud tallo	$\widehat{Lt} = 10.0524X_A + 8.6119X_C + 10.7799X_T$ $R^2 = 0.9737$ $AIC = 691.3954$	$\widehat{Lt} = 9.12512X_A + 8.34224X_C + 10.11425X_T + 6.45252X_AX_T$ $R^2 = 0.9766$ $AIC = 676.7766$
Longitud raíz	$\widehat{Lr} = 11.2927X_A + 10.5231X_C + 11.9512X_T$ $R^2 = 0.9552$ $AIC = 839.7029$	$\widehat{Lr} = 9.9546X_A + 10.3998X_C + 11.5417X_T + 5.1162X_AX_C + 7.9347X_AX_T$ $R^2 = 0.9595$ $AIC = 827.5368$
Grosor tallo	$\widehat{Gt} = 0.1584769X_A + 0.1584769X_C$ $+ 0.1590942X_T$ $R^2 = 0.999$ $AIC = -1389.926$	$\widehat{Gt} = 0.1584845X_A + 0.1584845X_C + 0.1590147X_T$ $R^2 = 0.999$ $AIC = -1383.945$
Número de hojas	$\widehat{Nl} = 3.0855X_A + 2.8562X_C + 3.0590X_T$ $R^2 = 0.95$ $AIC = 384.4571$	$\widehat{Nl} = 3.02289X_A + 2.90915X_C + 3.06576X_T$ $R^2 = 0.9503$ $AIC = 389.1983$
Emergencia total a las 60 horas	$\widehat{Et60} = 96.750X_A + 87.456X_C + 94.044X_T$ $R^2 = 0.9971$ $AIC = 68.74936$	$\widehat{Et60} = 88.755X_A + 82.996X_C + 94.105X_T + 61.196X_AX_C$ $R^2 = 0.9998$ $AIC = 48.11029$
Porcentaje de plantas trasplantables	$\widehat{Pt} = 100.195X_A + 87.425X_C + 100.680X_T$ $R^2 = 0.9982$ $AIC = 64.73139$	$\widehat{Pt} = 94.075X_A + 83.265X_C + 99.939X_T + 46.593X_AX_C$ $R^2 = 0.9996$ $AIC = 55.34939$

Fuente: elaboración propia.

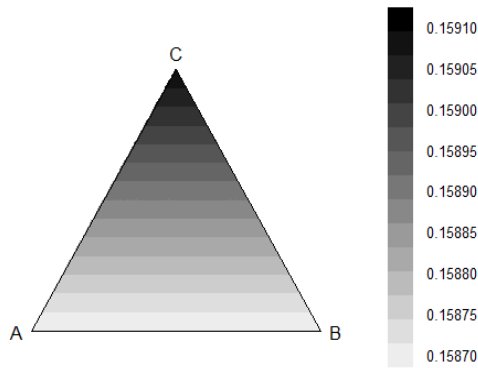
Finalmente, se realizó el análisis para las seis variables de respuesta haciendo uso de los diagramas ternarios y sus rangos óptimos. Se priorizaron las variables de respuesta en orden de la importancia que genera para la empresa. Con base a la importancia se formó el siguiente orden: porcentaje de germinación a las 60 horas, porcentaje de plantas trasplantadas, longitud de la raíz, longitud del tallo, número de hojas y grosor del tallo; siendo la primer variable la que fue asignada con un mayor peso y la última la más insignificante. En síntesis, el área del triángulo que generó las condiciones óptimas después de la priorización, fue el área que se encuentra entre los vectores A y C, es decir, el tratamiento 6 que contiene una mezcla binaria de proporción 0.5:0.5 arena y turba. El tratamiento 10 también cumplió con los criterios óptimos en las variables, para el cual se tiene una formulación de 0.4:0.3:0.3 de arena, cascarilla de arroz y turba respectivamente.



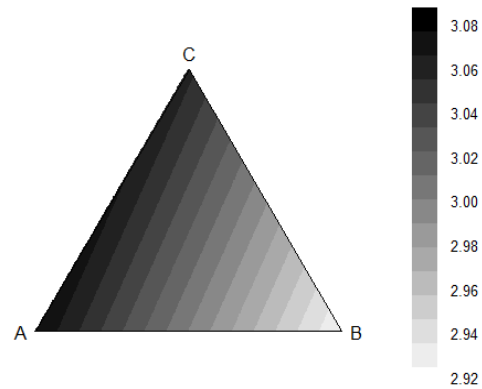
a. Efecto en diferentes formulaciones para longitud del tallo.



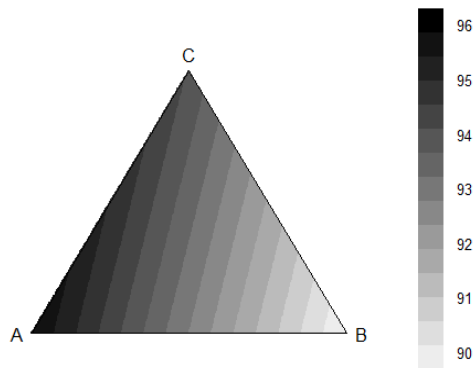
b. Efecto en diferentes formulaciones para longitud de la raíz.



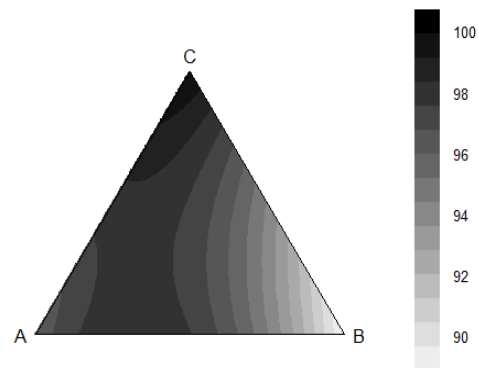
c. Efecto en diferentes formulaciones para grosor del tallo.



d. Efecto en diferentes formulaciones para número de hojas.



e. Efecto en diferentes formulaciones para emergencia.



f. Efecto en diferentes formulaciones para plantas trasplantadas.

Figura 3. Gráficos de contorno para cada variable dependiente.

En la figura 3 a-f el vector A representa X_A , el vector B representa X_C y el vector B representa X_T .

Con el objetivo de determinar la eficacia de los tratamientos obtenidos, estos tratamientos fueron comparados con las variables de respuesta obtenidas para el humus en el mismo ensayo; los resultados para los tratamientos 6, 10 y el humus fueron analizados a partir de la tabla 5 y analizados con respecto a los gráficos 3.a-f. El tratamiento 6 presentó mejores resultados que el humus para porcentaje de emergencia, longitud del tallo y número de hojas; el tratamiento 10 presentó mejor resultado que el humus en cuanto a porcentaje de emergencia y finalmente, el humus presentó mejores resultados únicamente en longitud de la raíz. Es decir, en relación a las variables de respuesta, el humus fue superado por el tratamiento 6 con las variables de respuesta más importantes según la priorización hecha por la empresa. Se usaron los diagramas ternarios obtenidos para ubicar las variables de respuesta más importantes (porcentaje de emergencia a las 60 horas, porcentaje de plantas trasplantadas, longitud del tallo y longitud de la raíz) arrojados por el humus, con el fin de reconocer las zonas óptimas de cada variables y poder compararlas visualmente con las del humus (figura 4); finalmente se trasponen los gráficos para concluir al respecto (figura 5).

Finalmente, haciendo uso de la tabla 4 y el resultado de los análisis obtenidos se realizó la confrontación del análisis económico del tratamiento 6 con la formulación 0.5:0.5 arena y turba frente al humus; en el cual, para este experimento los costos por alveolo fueron de \$ 12.19 para el tratamiento 6 y \$82.08 para el humus; se consideraron también los costos asociados a mano de obra y el tiempo (expresado en costos) de la preparación de la mezcla del tratamiento 6 debido a que es mayor que el humus por requerir tiempo y esfuerzo para la toma de medidas. El costo de mano de obra para el tratamiento 6 por cada alveolo fue de 108.33, mientras que para el humus fue \$ 91.67, sin embargo, a pesar que el tratamiento tiene un valor mayor, este no supera los costos del humus. De esta manera, para una producción de 1000 lechugas se obtiene una diferencia en costos totales de \$ 66,600 haciendo uso del sustrato óptimo y obteniendo valores de respuesta mayores que los obtenidos al usar humus puro como sustrato.

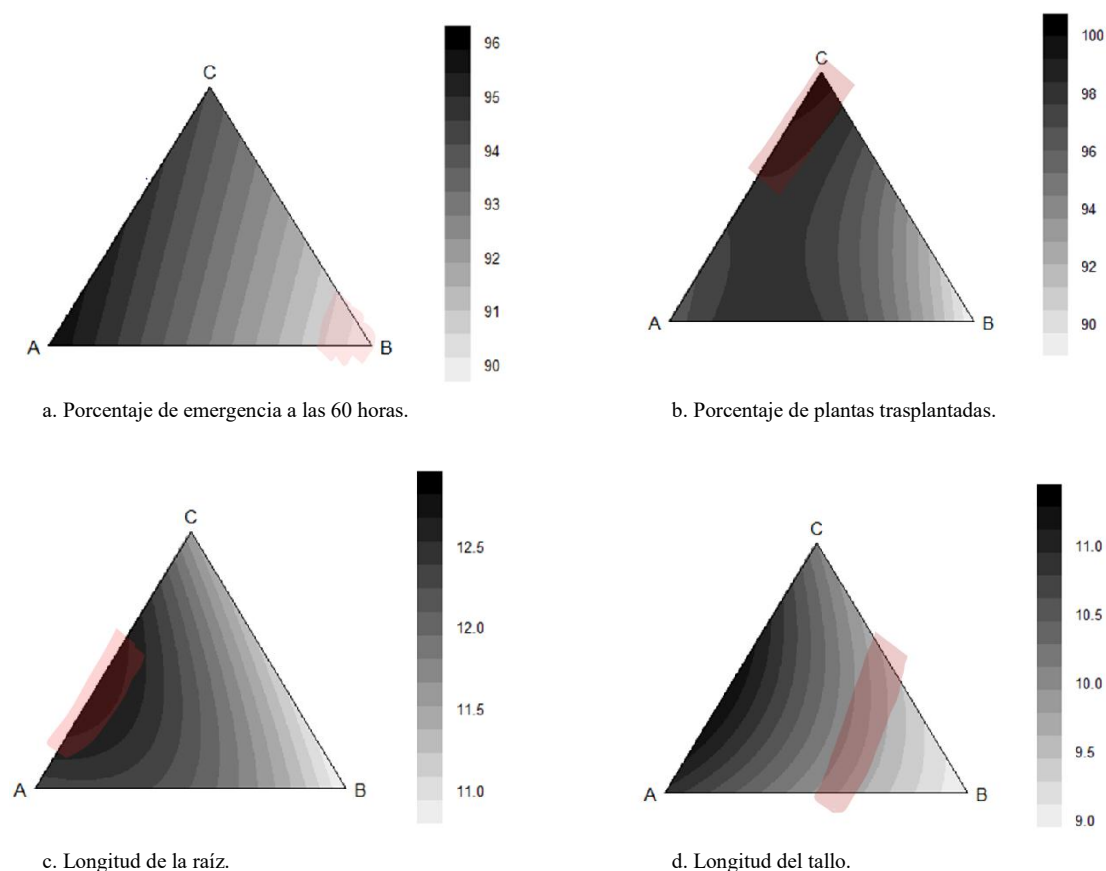


Figura 4. Zonas óptimas con relación al humus.

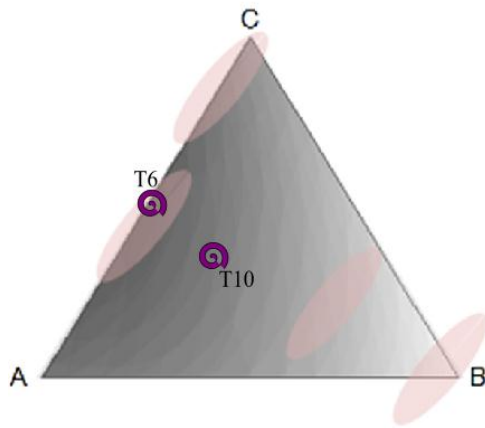
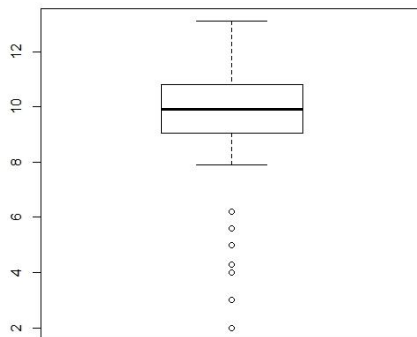


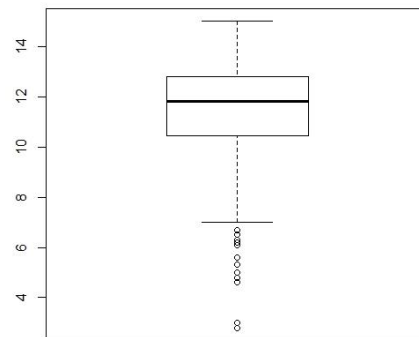
Figura 5. Gráficos de contorno traspuestos para variables de respuesta y humus.

Análisis gráficos de caja y bigotes

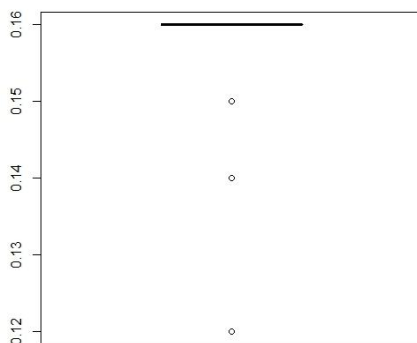
Se realizaron los gráficos de caja y bigotes para las mismas regresiones seleccionadas por akaike. Estos se presentan en la figura 5.a-f; donde, para las figuras 5.a y 5.b se presentan algunos valores atípicos sin embargo estos no generan diferencias significativas. Las figuras 5.c y 5.d presentan la misma tendencia de valores a excepción por un porcentaje menor de datos atípicos. Por último, las figuras 5.e y 5.f presentan una caja más alargada, pero los valores se mantienen entre 83.33 y el 100% del eje y; es decir, aunque hay una diferencia entre los valores, su distribución se encuentra cerrada en el rango mencionado anteriormente.



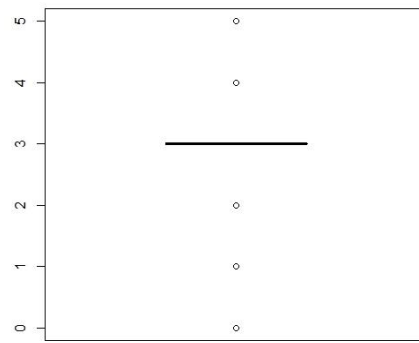
a. Diagrama de caja y bigotes para longitud del tallo.



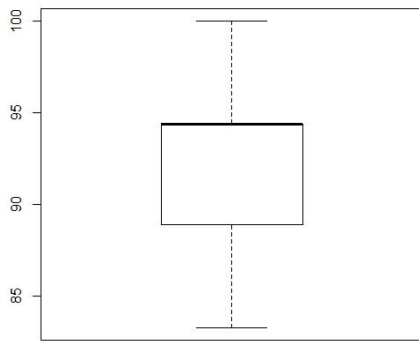
b. Diagrama de caja y bigotes para longitud de la raíz.



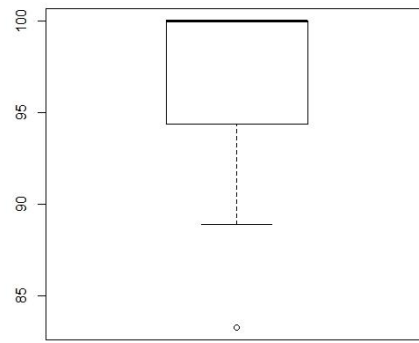
c. Diagrama de caja y bigotes para grosor del tallo.



d. Diagrama de caja y bigotes para número de hojas.



e. Diagrama de caja y bigotes para emergencia.



f. Diagrama de caja y bigotes porcentaje trasplantado.

Figura 6. Diagramas de caja y bigotes para modelaciones

4. Conclusiones

A partir de los resultados, se puede concluir que el diseño de experimentos de mezclas fue una herramienta útil para determinar las formulaciones evaluadas para las variables de respuesta: porcentaje de germinación de la semilla en las 60 horas previas a la siembra, porcentaje de plantas trasplantadas, longitud de la raíz y longitud del tallo a partir de los sustratos base: arena, cascarilla de arroz y turba. Por otra parte, el tiempo a trasplante y porcentaje de germinación total no fueron variables determinantes para la obtención de resultados debido a que los coeficientes en las regresiones no presentaron diferencias significativas; al igual que el número de hojas y grosor del tallo que según los diagramas de caja y bigotes tuvieron una variación menor al 5% de toda la muestra, por lo tanto se concluyó que estas variables no son criterios considerables.

Los análisis estadísticos posteriores permitieron la formulación óptima de sustrato para germinación de semilla de lechuga crespa *Lollo bionda levistro* en cultivos hidropónicos, dando como tratamiento óptimo 0.5:0.5 arena y turba respectivamente. El análisis comparativo con respecto al sustrato comercial (humus) demostró que las variables de respuesta del tratamiento 6 en relación al humus fueron las deseadas, obteniendo valores mayores y el análisis de costos arrojó un costo de producción para el sustrato óptimo de casi la tercera parte (33.5%) del que se debe incurrir al usar humus en el mismo procedimiento.

Esta investigación abre paso al aprovechamiento de un material inerte de bajo costo como lo es la arena para ser usada en la etapa de almácigo y post-almácigo del cultivo hidropónico de la lechuga crespa; de igual forma, permite la reducción del uso de turba pura que al igual que el humus tiene un costo alto en comparación con las otras mezclas; en efecto, propiedades físicas como la porosidad de la arena genera más espacios intersticiales en la mezcla, generando un menor uso de turba. Incluso, se presenta una oportunidad para los agricultores locales que trabajan en hidroponía al usar esta formulación óptima, reduciendo los costos de producción, generando resultados óptimos y haciendo un uso más eficiente de los recursos. Por medio de esta tesis se puede abrir paso a futuras investigaciones ya sea usando la formulación óptima en la etapa de trasplante definitivo para hidroponía en sólidos o para investigar el efecto del sustrato óptimo en la cultivación de otros alimentos.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Si se considera que se debe incluir información adicional para la comprensión del proyecto de grado se debe entregar esta documentación en formato digital, agregándola a una carpeta de Google Drive y compartiendo el enlace corto en la Tabla 7.

Tabla 7. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nomb re	Desarrollo (propio/terce ros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Anexo 1	Propio	Análisis de costos	https://drive.google.com/drive/folders/10z5kutP2nkJWUgfQXxjBYmXKibPqbGQp?usp=sharing
Anexo 2	Propio	Variables de respuesta	
Anexo 3		Ficha técnica semilla	
Anexo 4	Propio	Modelaciones R	
Anexo 5		Fotos del experimento	

Referencias

- [1] Finagro, “El momento del Agro | Finagro.” [Online]. Available: <https://www.finagro.com.co/noticias/el-momento-del-agro>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [2] Dane, “Exportaciones de Colombia 2017.” [Online]. Available: <https://www.dinero.com/economia/articulo/exportaciones-de-colombia-2017-dane/255032>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [3] OEC, “Colombia (COL) Exportaciones, Importaciones, y Socios comerciales.” [Online]. Available: <https://atlas.media.mit.edu/es/profile/country/col/>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [4] César Riqui Oliveros Cárdenas *et al.*, “Estrategia Colombia Siembra,” pp. 1–55, 2016.
- [5] M. of Agriculture, “Hydroponics.”
- [6] M. Raviv, R. Wallach, A. Silber, and A. Bar-Tal, “Substrates and their Analysis,” *Hydroponic Prod. vegetables Ornamentals*, pp. 25–101, 2002.
- [7] R. D. E. C. Agr and V. X. No, “Evaluation of Two Sustratos and Two Dose of Fertilization Under,” no. 2, pp. 95–108, 2011.
- [8] N. Gruda and J. Tanny, “Protected Crops,” in *Horticulture: Plants for People and Places, Volume 1*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 327–405.
- [9] G. Quesada and C. Méndez, “Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas,” *Agron. Mesoam.*, vol. 16, no. 2, pp. 171–183, 2005.
- [10] N. E. Barrios Arreaga, “Evaluación del cultivo de la lechuga, *Lactuca sativa* L. bajo condiciones hidropónicas en Pachalí, San Juan Sacatepéquez, Guatemala,” Universidad De San Carlos De Guatemala, 2004.
- [11] T. Sabat, S. Kaniszewski, and J. Dyśko, “Effect of flood fertigation on yield of greenhouse lettuce grown in different substrates,” *J. Elem.*, vol. 20, no. 2, pp. 407–416, 2015.
- [12] C. Sonneveld and W. Voogt, “Substrates: Chemical Characteristics and Preparation,” in *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, 2009, pp. 227–256.
- [13] M. V Mickelbart, K. M. Stanton, J. J. Camberato, and P. Agronomy, “Commercial Greenhouse and Nursery Production Soil pH,” *Purdue Univ.*, 2007.
- [14] A. P. Torres, D. Camberato, R. G. Lopez, and M. Mickelbart, “Producción comercial de cultivos cajo invernadero y vivero,” *Purdue Ext.*, pp. 1–6, 2001.
- [15] D. L. Cortés-D, J. H. Pérez-B, and J. H. Camacho-Tamayo, “Spatial relation between electrical conductivity and some chemical soil propierties,” 2013.

- [16] M. De La Alcalinidad, S. Hidropónicos, A. P. Torres, R. G. Lopez, M. V Mickelbart, and P. Web De Floricultura, "Manejo de la alcalinidad en sustratos hidropónicos."
- [17] G. Mustafa *et al.*, "Guar, jantar, wheat straw, and rice hull composts as replacements for peat in muskmelon transplant production," *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, vol. 5, no. 4, pp. 323–332, Dec. 2016.
- [18] P. Sambo, F. Sannazzaro, and M. R. Evans, "Physical properties of ground fresh rice hulls and sphagnum peat used for greenhouse root substrates," vol. 18, no. September, 2008.
- [19] S. Fety, "Lechuga Levistro."